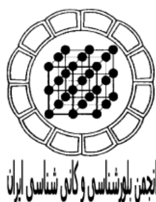
مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال سی و یکم، شمارۀ چهارم، زمستان ۱۴۰۲، از صفحۀ ۷۸۵ تا ۷۹۴



اثر دمای بستر بر لایه‌های نازک اکسید مولیبدن تهیه شده به روش افشانه گرمایی در دیود

مجتبی عطایی، محمدرضا فدوی اسلام*

دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۴/۲۴)

چکیده: در این پژوهش، دیودها با لایه نشانی لایه نازک اکسید مولیبدن بر بستر سیلیکون آلایش شده نوع p با هدف بررسی اثر دمای بستر بر ویژگی دیود ساخته شدند. به این منظور، لایه‌های نازک اکسید مولیبدن در بسترهای با دمای ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ^{o}C ۵۰۰ به روش افشانه گرمایی لایه‌نشانی شدند. ویژگی‌های ساختاری و نوری لایه‌های نازک بررسی گردید. آنها ماهیتی بسبلوری با ساختار راست‌گوشی و قله‌های پراشی مربوط به صفحه‌های (۰۲۰)، (۰۴۰) و (۰۶۰) را نشان می‌دهند که قله ارجح در همه نمونه‌ها (۰۴۰) است. ریختار سطح نمونه‌ها بدون ترک و دارای دانه‌بندی مستطیل شکل با اندازه دانه‌های در گستره ۱۱۰ تا ۲۱۰ نانومتر است. همچنین زبری متوسط سطح آنها در گستره ۱۵۷ تا ۱۶۷ نانومتر اندازه‌گیری شد. گاف نوری نمونه‌ها در گستره ۲٫۸۴ تا eV ۲٫۹۵ برآورد شد. نمودار ولتاژ – جریان نمونه‌ها رفتار دیودی آنها را نشان داد. دیود ساخته شده در دمای بستر ^{o}C۴۰۰ دارای کمترین ولتاژ آستانه است.

واژه‌های کلیدی: *اکسید مولیبدن؛ لایه نازک؛ افشانه گرمایی؛ دیود.*

مقدمه

استفاده از لایه‌های نازک در ساخت قطعه‌های مدرن و پیچیده، رشد چشم‌گیری داشته است، بطوریکه از آنها می‌توان در حوزه‌های اپتیک، شیمی، مکانیک، مغناطیس و الکتریسیته استفاده کرد [۱]. یکی از مواد قابل استفاده در لایه نازک، اکسید فلزهای واسط می‌باشد [۲]. لایه نازک اکسید فلزات واسطه به دلیل تنوع ویژگی‌ها و کاربرد آن به طور گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۳]. اکسید مولیبدن (MoO_3) یکی از اکسیدهای فلزهای واسط است که به دلیل رسانایی الکتریکی بالا و عبور نوری در ناحیه مرئی یک ماده کاربردی در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی است [۴]. لایه نازک اکسید مولیبدن کاربردهای گسترده‌ای در زیست پزشکی، حسگر گاز، باتری‌ها، شبه خازن‌ها، الکتروکرومیک، سلول‌های خورشیدی، دستگاه‌های کلیدزنی و دیود پیوند p-n دارد [۵]. اکسید مولیبدن اغلب به صورت فازهای α-MoO_3 (راستگوشی)، β-MoO_3 (تک میل) و h-MoO_3 (شش گوشی) دیده می شود [۶]. این سه فاز دارای ویژگی های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی چون اندازه بلوری [۷]، ضریب شکست [۸]، انرژی گاف نواری [۹]، طیف جذب [۱۰]، رسانندگی الکتریکی [۱۱]، رنگ، شفافیت و سختی مکانیکی هستند [۱۲]. لایه‌های نازک اکسید مولیبدن با انرژی گاف نواری در گستره ۲٫۳۹ تا ۳٫۰ الکترون ولت، نیمرسانای نوع n هستند [۱۳].

لایه‌های نازک اکسید مولیبدن به روش‌های رسوب لایه اتمی، چرخشی، بخار شیمیایی، کندوپاش مگنترون، حمام شیمیایی و افشانه گرمایی (اسپری پایرولیزز) تهیه شده اند [۱۴]. روش افشانه گرمایی مزایای بسیاری چون هزینه کم، سهولت در انجام، لایه نشانی به صورت وسیع، صرفه جویی در زمان و پوشش یکنواخت دارد [۱۵]. دمای بستر، نرخ پاشش،

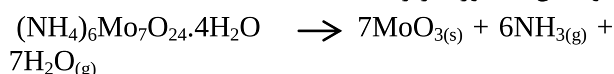
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۳۵۵۰۸۱۹، نمابر: ۰۲۳۳۵۲۲۰۰۹۰، پست الکترونیکی: m.r.fadavieslam@du.ac.ir

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.785]

حجم و غلظت محلول پاشش شرایطی از روش افشانه گرمایی هستند که می‌توانند بر ویژگی‌های لایه نازک اثر داشته باشند و ویژگی های لایه‌های نازک را با آنها می‌توان کنترل کرد [۱۶]. در این پژوهش، لایه‌های نازک اکسید مولیبدن به روش افشانه گرمایی در دماهای بستر مختلف بر زیرلایه سیلیکون آلایش یافته نوع p لایه نشانی شدند. سپس با تشکیل پیوندگاه p-n، اثر دمای بستر بر رفتار الکتریکی دیودها بررسی گردید.

روش تجربی

محلول پاشش ۰/۱ مولار مولیبدن از حل ۳/۰۹۸ گرم پیش ماده آمونیوم مولیبدات چهار آبه ($N_6H_{24}Mo_7O_{24}$) در ۵۰ میلی‌لیتر آب یونزدایی شده تهیه گردید. محلول به مدت ۶۰ دقیقه در دمای محیط به خوبی هم زده شد تا محلولی بی‌رنگ و کاملاً شفاف بدست آید. فرآیند کلی واکنش و تشکیل اکسید مولیبدن به صورت زیر است:



$$(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O \longrightarrow 7MoO_{3(s)} + 6NH_{3(g)} + 7H_2O_{(g)}$$

لایه‌ها در شرایط یکسان فاصله ۳۵ سانتی‌متر بین نازل و بستر، نرخ چرخش صفحه داغ ۳۰ دور در دقیقه، نرخ پاشش ۵ میلی-لیتر بر دقیقه و فشار ۳ اتمسفر برای گاز حامل هوا در دماهای بستر ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد با گام ۵۰ درجه سانتیگراد بر زیر لایه سیلیکون تهیه شدند. پیش از تهیه لایه‌های اکسید مولیبدن، زیرلایه سیلیکون برای پاکسازی از چربی و گرد و غبار به مدت پنج دقیقه در محلول $HCL+H_2O$ قرار داده شد و سپس با آب دو بار تقطیر شسته شد. پس از نشاندن اکسید مولیبدن بر زیر لایه سیلیکون براساس طرحواره شکل ۱ برای بررسی رفتار الکتریکی دیودها از نقره برای الکترودگذاری استفاده شد.

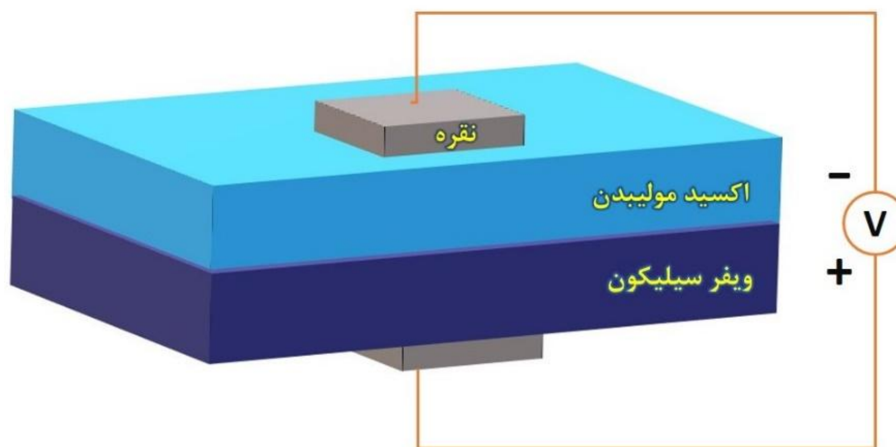
مشخصه‌یابی

برای تعیین ساختار بلوری لایه ها از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل D8 ADVANCE-BRUKER استفاده شد. ریخت‌شناسی سطح با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3 TESCAN و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مدل Nano Wizard II انجام شد. بمنظور بررسی ویژگی های نوری از نور سنج فرابنفش- مرئی (UV-Vis) مدل Shimadzo-1800 در گستره طول موج های ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر استفاده گردید. مشخصه جریان-ولتاژ دیودهای ساخته شده در دمای اتاق با دستگاه اندازه‌گیری V-I، بررسی شد.

نتایج و بحث

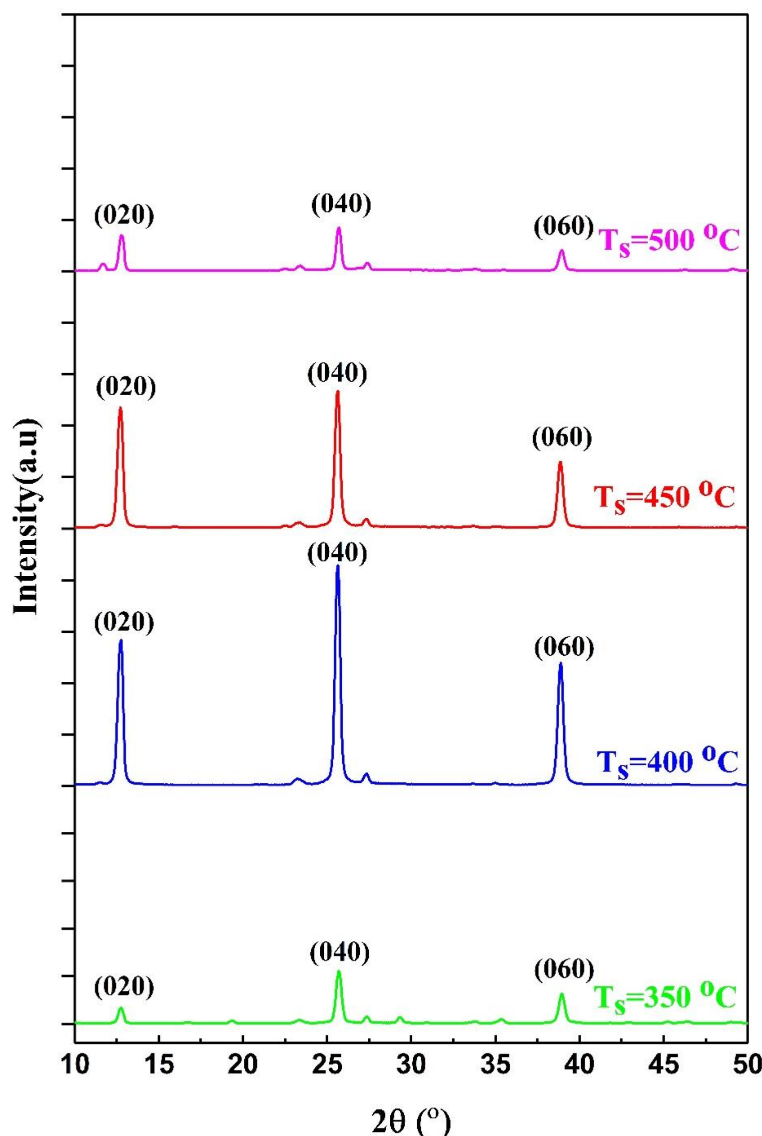
بررسی ویژگی‌های ساختاری

الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک اکسید مولیبدن تهیه شده در دماهای بستر مختلف در شکل ۲ آورده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که آنها دارای ساختار بسبلوری در فاز راستگوشی α-MoO_3 هستند. قله‌های پراش نمونه‌ها برای صفحه‌های بلوری (۰۲۰)، (۰۴۰) و (۰۶۰) با کارت استاندارد JCPDS به شماره ۰۵۰۸-۰۰۵ همخوانی دارند [۱۷]. قله ارجح برای همه نمونه‌ها مربوط به صفحه (۰۴۰) بوده که در سایر پژوهش‌ها نیز دیده شده است [۱۸]. با افزایش دمای بستر از ۳۵۰ تا ۴۰۰°C، شدت قله‌ها افزایش‌یافته و سپس با افزایش بیشتر دمای بستر از ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد، شدت قله‌ها کاهش یافته است.



شکل ۱ طرحواره دیود ساخته شده

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.785]



شکل ۲ الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک اکسید مولیبدن تهیه شده در دماهای بستر مختلف.

اندازه متوسط نانو بلورک‌ها (D)، چگالی دررفتگی ها (δ) و میکروکرنش‌ها (ε) بر پایه قله (۰۴۰) با استفاده از روابط زیر محاسبه شد [۱۹]:

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad (۲)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \qquad (۳)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta \cos\theta}{4} \qquad (۴)$$

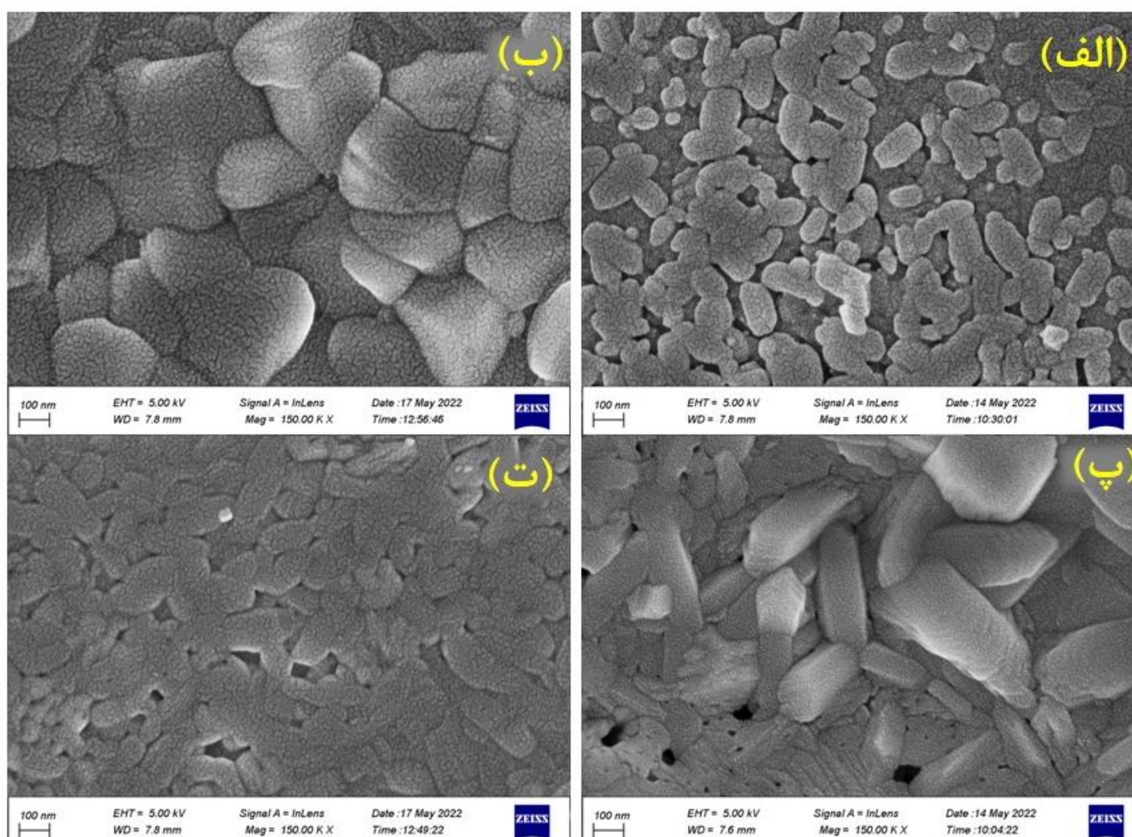
در این روابط θ زاویه پراش و β نیم پهنا در نصف شدت بیشینه قله پراش است. نتایج این محاسبه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. دیده می‌شود که اندازه نانوبلورک‌ها با افزایش دمای بستر از ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد افزایش و سپس با افزایش بیشتر دما تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد. دلیل این امر به احتمال بسیار این است که در دمای ۴۰۰°C، واکنش شیمیایی مناسب برای تشکیل لایه نازک اکسید مولیبدن بر بستر رخ می‌دهد. افزون بر این، بزرگ شدن و متراکم شدن نانوبلورک‌ها در دمای بستر ۴۰۰°C رخ می‌دهد. در مقابل، افزایش دمای بستر به بالاتر از ۴۰۰°C باعث می‌شود که محلول پاشش انرژی گرمایی بیشتر از مقدار مورد نیاز برای تشکیل ساختار بلوری فاز اکسید مولیبدن دریافت کند که می‌تواند منجر به تجزیه گرمایی ناقص و کاهش بلورینگی لایه‌ها شود [۲۰]. کاهش قابل توجه در شدت قله‌های پراش در دماهای بالاتر نیز به کاهش شدید بلورینگی و کرنش شبکه بلوری ایجاد شده نسبت داده می‌شود.

جدول ۱ مشخصه‌های ساختاری برآمده از داده‌های XRD نمونه‌ها.

دمای بستر (°C)	2θ (°)	FWHM (°)	d (Å)	a (Å)	D (nm)	$\delta\times10^{15}$ (lines/m²)	$\varepsilon\times10^{-3}$ (lines² m⁴)
۳۵۰	۲۵٫۷۲	۰٫۶۰۹	۲٫۴۰۹۰۵	۴٫۱۷۲۶	۲۵	۱٫۸۴	۱٫۵۲
۴۰۰	۲۵٫۸۱	۰٫۷۷۲	۲٫۴۱۱۱۷	۴٫۱۷۶۲۷	۴۸	۱٫۷۶	۱٫۳۵
۴۵۰	۲۵٫۷۷	۰٫۶۵۶	۲٫۴۱۱۴۲	۴٫۱۷۶۷	۳۷	۱٫۸۲	۱٫۴۴
۵۰۰	۲۵٫۷۷	۰٫۶۸	۲٫۴۰۶۷۴	۴٫۱۶۸۶	۳۲	۱٫۸۶	۱٫۵۳

بررسی ویژگی‌های ریز ساختاری

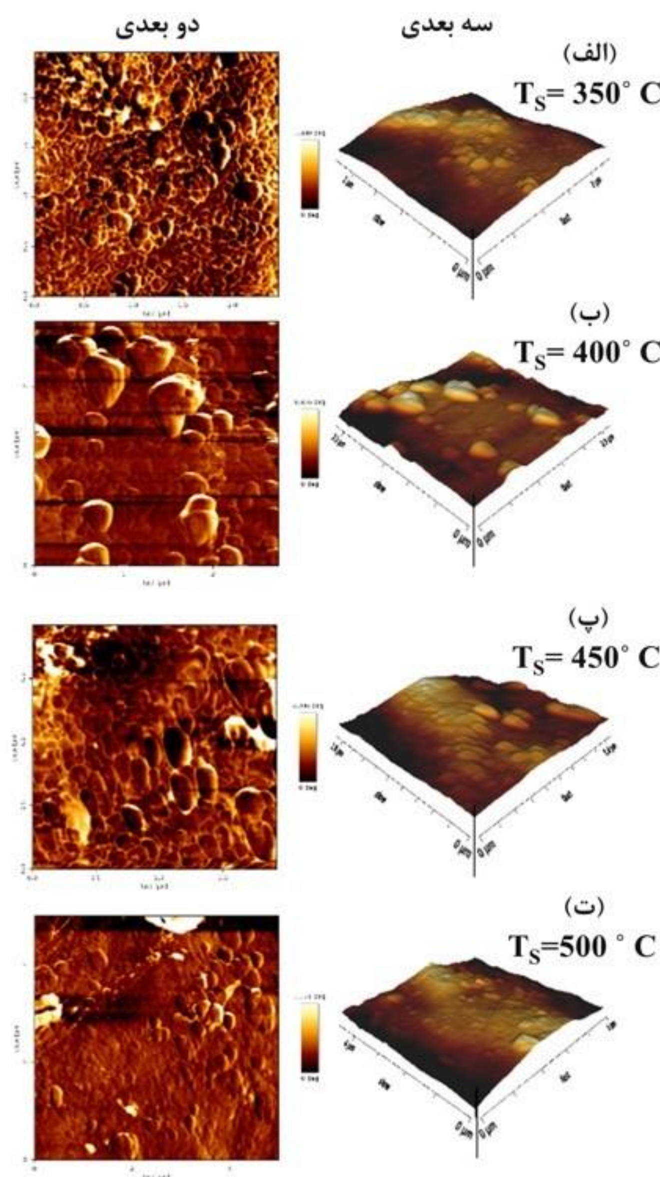
برای بررسی ریختار سطح لایه‌های نازک اکسید مولیبدن تصاویر FE-SEM آنها ثبت شد که در شکل ۳ آورده شده‌اند دیده می‌شود که بطور کلی ریختار لایه‌ها مشابه هستند و سطح آنها تقریباً صاف با چسبندگی یکنواخت و بدون حفره است. شبیه این ریختار برای سایر لایه‌های نازک اکسید مولیبدن گزارش شده است [۲۱]. افزون بر این، سطح لایه‌های نازک با ذرات مستطیل شکل ناهمگن، با برای‌گیری تصادفی پوشیده شده است. با این حال، ریختار لایه‌ها به شرایط لایه‌نشانی بستگی دارد. چنان که دیده می‌شود، با افزایش دمای بستر از ۳۵۰ به ۴۰۰°C دانه‌های تقریباً مستطیل شکل بزرگ‌تر و متراکم‌تر شده‌اند. سپس با افزایش بیشتر دمای بستر از ۴۰۰ تا ۵۰۰°C، ناهمواری سطحی افزایش یافته و اندازه دانه‌ها کوچکتر شده است. متوسط اندازه دانه‌ها در دماهای ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب ۱۲۰، ۲۱۰، ۱۷۰ و ۱۱۰ نانومتر براورد شده‌اند.



شکل ۳ تصاویر FESEM لایه‌های اکسید مولیبدن با دماهای بستر (الف) ۳۵۰، (ب) ۴۰۰، (پ) ۴۵۰ و (ت) ۵۰۰ درجه سانتیگراد

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.785]

ریختار لایه‌ها با تصاویر AFM آنها تحلیل شد. تصاویر دو بعدی و سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی لایه‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. بررسی تصاویر AFM نشان می‌دهد که ریختار لایه‌ها تابعی از شرایط لایه نشانی است. متوسط زبری سطح لایه‌های تهیه شده در دمای بستر ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب ۱۶۷/۲۵، ۱۵۸/۳۲، ۱۶۲/۶۱ و ۱۶۹/۳۵ نانومتر برآورد شد. افزایش دمای بستر از ۳۵۰ به ^{o}C ۵۰۰ منجر به کاهش و سپس افزایش مقادیر زبری لایه‌ها می‌شود؛ مشابه این نتایج پیشتر گزارش شده است [۲۲، ۲۳]. زبری سطح متاثر از مراکز هسته‌ها در فرآیند رشد لایه است [۲۳]. تغییرات زبری سطح لایه‌ها را می‌توان به میزان بلورینگی لایه‌ها نسبت داد [۲۴]. افزایش زبری ناشی از انتشار سطحی است که منجر به افزایش تدریجی شدت قله‌ها می‌شود و در مقابل، کاهش زبری به علت انتشار پراکنده در سطح است که موجب انتشار سطحی اتم‌ها یا مولکول‌ها و باعث باز توزیع و ایجاد سطح هموارتر می‌شود [۲۲]. همچنین کاهش زبری ممکن است به دلیل تغییر در انرژی گرمایی و شیب انرژی سطحی طی رشد دانه‌های MoO_3 باشد که منجر به اشغال جایگاه‌های مطلوبتر توسط اتم‌های Mo و O می‌شود [۲۳] لایه صاف و یکنواخت یک نیاز اساسی برای کاربردهای الکترونیک، الکتروکرومیک و اپتوالکترونیک است و به ترابرد مناسب حامل‌ها کمک می‌کند [۲۵].



شکل ۴ تصاویر AFM دو بعد و سه بعدی لایه‌های اکسید مولیبدن با دماهای بستر (الف) ۳۵۰، (ب) ۴۰۰، (پ) ۴۵۰ و (ت) ۵۰۰ درجه سانتیگراد.

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.785]

بررسی ویژگی‌های نوری

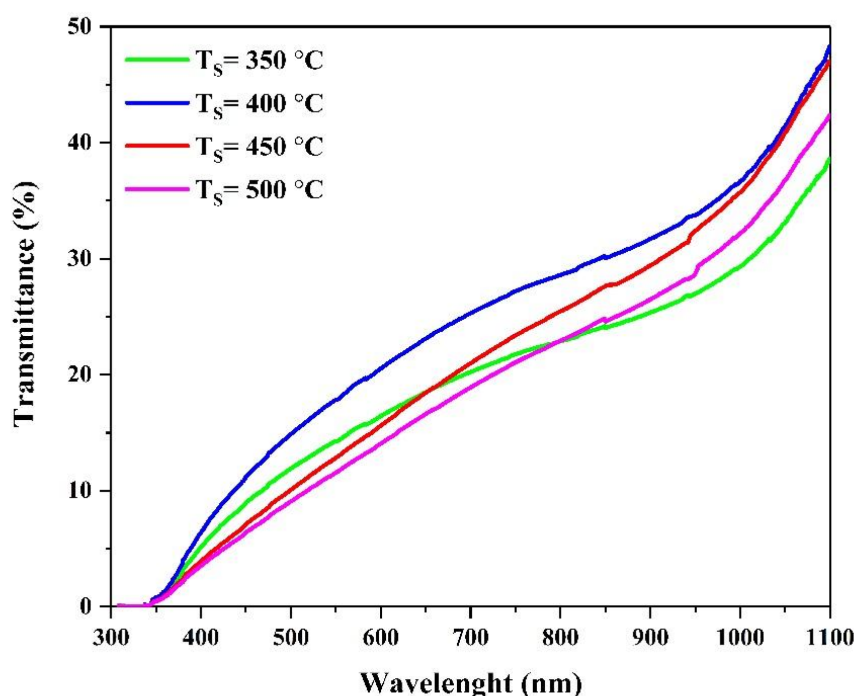
ویژگی نوری بی‌مانند لایه‌های نازک اکسید مولیبدن آنها را برای انواع کاربردهای اپتوالکترونیک چون دیود پیوند p-n مناسب می‌کند. بسیاری از این کاربردها به شفافیت بالا در گستره UV-Vis نیاز دارند. این ویژگی را می‌توان با بهینه-سازی شرایط لایه‌نشانی بدست آورد که نقش مهمی در مشخصه‌های نوری لایه‌های نازک اکسید مولیبدن دارند. این ویژگی‌ها مربوط به تهیجای اکسیژن، ساختار، زبری سطح، کیفیت بلوری، اندازه دانه‌ها و ضخامت لایه‌های نازک است [۲۶]. شکل ۵ طیف‌های عبور نور لایه‌ها را در گستره طول موج‌های ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ بر این اساس، لایه‌ها دارای شفافیت مناسبی در نواحی مرئی و نزدیک به فروسرخ هستند، بطوریکه متوسط شفافیت آنها ۱۰ تا ۴۵ درصد در ناحیه مرئی است. میزان عبور نوری لایه‌های نازک با افزایش دمای بستر از ۳۵۰ تا ۴۰۰°C افزایش و سپس با افزایش بیشتر دمای بستر تا ۵۰۰°C، کاهش می‌یابد. بیشترین عبور نوری برای نمونه تهیه شده با دمای بستر ۴۰۰ درجه سانتیگراد می‌تواند به علت اندازه بیشتر نانو بلورک‌ها و دانه‌ها و زبری سطح کمتر نسبت به سایر نمونه‌ها باشد [۲۷]. کاهش زبری سطح موجب پراکندگی نور کمتر و در نتیجه افزایش عبور می‌شود [۲۸]. ضریب جذب نوری (α) با رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن d، R و T بترتیب، ضخامت، بازتاب و عبور لایه‌های نازک هستند. [۲۹]:

$$\alpha = \frac{1}{d}\ln\left(\frac{(1-R)^2}{T}\right) \qquad (۵)$$

گاف نوری (Eg) مستقیم را می‌توان از داده‌های جذب نوری با رسم نمودار $(\alpha h\gamma)^2$ بر حسب انرژی تابش فرودی $h\gamma$ و براساس رابطه تاوک و برون‌یابی قسمت خطی نمودار برای $h\gamma = ۰$ تعیین کرد [۲۹]:

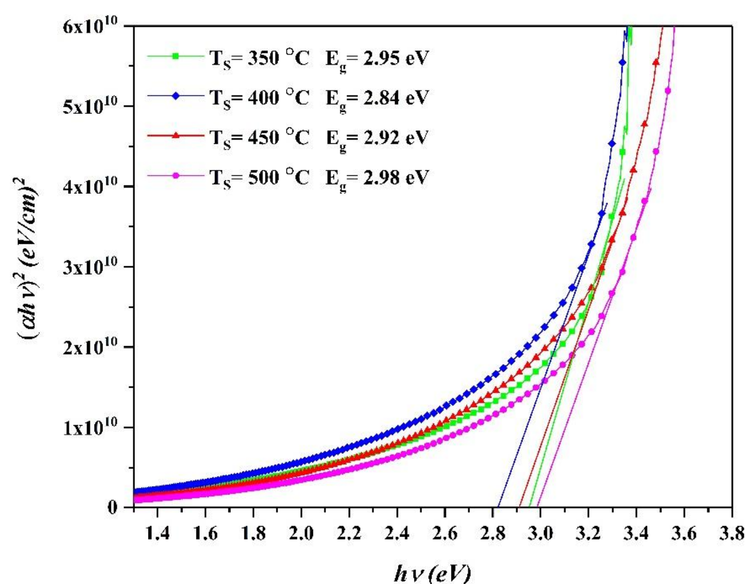
$$(\alpha h\vartheta)^2 = \beta\left(h\vartheta - E_g\right) \qquad (۶)$$

که β، یک مقدار ثابت است نمودار مقایسه‌ای تغییرات $(\alpha h\gamma)^2$ نسبت به $h\gamma$ نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر گاف نوری نمونه‌ها در گستره ۲٫۸۴ تا ۲٫۹۸ الکترون ولت برآورد شد که با نتایج گزارش شده در این زمینه همخوانی دارند [۳۰]. اندازه گاف نوری لایه‌های نازک به ماده اولیه و غلظت آن، شرایط تهیه لایه، ساختار لایه و دمای بستر بستگی دارد [۳۱]. گاف نوری نمونه تهیه شده در دمای بستر ۴۰۰°C دارای کمترین مقدار است. کاهش گاف نوری را می-توان به بهبود ساختار نمونه (افزایش شدت قله های پراش) و اندازه نانوبلورک‌ها نسبت داد [۳۰]. افزون بر این، افزایش اندازه دانه‌ها می‌تواند گاف نوری لایه‌ها را به دلیل اثر محدودیت کوانتومی کاهش دهد [۳۲].



شکل ۵ طیف عبور لایه با دمای بستر مختلف.

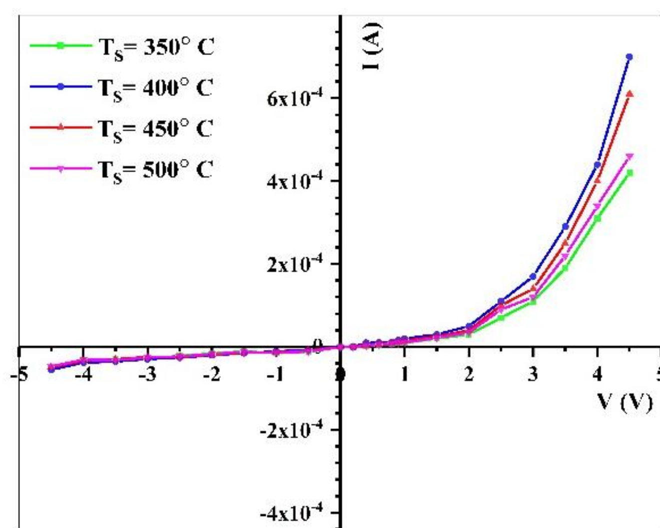
[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.785]



شکل ۶ گاف نواری لایه با دمای بستر مختلف.

مشخصه‌یابی دیود پیوند p-n

با لایه‌نشانی اکسید مولیبدن به روش افشانه گرمایی به عنوان نیمرسانای نوع n بر بستر سیلیکون نوع p در دماهای بستر ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد، پیوندگاه p-n تشکیل شد. نمودار مقایسه‌ای جریان – ولتاژ دیودهای ساخته شده در شکل ۷ ارائه شده است. بررسی این شکل رفتار دیودی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. ولتاژ ضعیف در پیش ولت معکوس و افزایش نمایی ولتاژ در پیش ولت مستقیم نشان دهنده یکسوکنندگی مناسب نمونه‌هاست. ولتاژ آستانه نمونه‌ها برای لایه‌های با دمای بستر ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب ۲٫۱، ۱٫۷، ۱٫۹ و ۲ ولت برآورد شد. نمونه تهیه شده در دمای ۴۰۰°C دارای ولتاژ آستانه کمتری از سایر دیودهاست که می‌تواند بخاطر بزرگ‌شدن و متراکم شدن نانوبلورک‌ها باشد. از سویی، برای قطعه‌های اپتوالکترونیک چون دیود پیوند p-n، لایه نازک باید دارای شفافیت بالا در ناحیه مرئی باشد. چنان که دیده شد، میزان عبور نوری لایه‌های نازک نخست با افزایش دمای بستر تا ۴۰۰°C ابتدا افزایش و سپس تا ۵۰۰°C کاهش یافت. این افزایش میزان عبور نور و کاهش گاف نوری در دمای ۴۰۰°C موجب بهبود بازترکیب الکترون – حفره در ناحیه تهی دیود و افزایش پدیده تونل زنی می‌شود که از عوامل موثر در کاهش ولتاژ آستانه است. مقادیر جریان – ولتاژ با گزارش‌های پیشین همخوانی دارد [۳۳].



شکل ۷ نمودار جریان – ولتاژ دیودهای ساخته شده

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.785]

برداشت

در این پژوهش، لایه‌های نازک اکسید مولیبدن به روش افشانه گرمایی بر لایه‌های شیشه‌ای تهیه شدند. اثر دمای بستر بر ویژگی‌های ساختاری و نوری لایه‌ها با XRD، FE-SEM، AFM و نورسنج فرابنفش- مرئی بررسی شد. تحلیل ساختاری نشان داد که لایه‌ها دارای ساختار بلوری راستگوشی هستند. افزایش دمای بستر تا $۴۰۰^{\circ}C$ باعث افزایش اندازه دانه‌ها، کاهش میانگین زبری و افزایش میزان عبور نور و کاهش گاف نوری شد. با استفاده از لایه نازک اکسید مولیبدن و زیر لایه سیلیکون دیود پیوند p-n نیز ساخته شد. دیود تهیه شده در دمای $۴۰۰^{\circ}C$ دارای ولتاژ آستانه کمتری از سایر نمونه‌ها بود.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[1] Acosta Edwin, *"Thin Films/Properties and Applications."* In Thin Films. Intech Open, 2021.

[2] Yuonesi M., Izadifard M., Ghazi M. E., GHODSI F. ESMAILI, *"Influence of Co and Fe substitution on optical and structural properties of zinc oxide thin films."* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 19 (2011): 65-72.

[3] Kumar Anil, Chandra Shekhar Prajapati, Sahay P. P., "*Results on the microstructural, optical and electrochromic properties of spray-deposited MoO3 thin films by the influence of W doping."* Materials Science in Semiconductor Processing 104 (2019): 104668.

[4] Ghaleghafi E, Rahmani M., *"Fabrication, characterization and investigation of gas sensing properties of MoO_3 thin films*. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 2019;27(2):475-86

[5] Yusuf Bashir, Mohd Mahadi Halim, Md Roslan Hashim, Mohd Zamir Pakhuruddin, *"Structural, optical, and electrical properties of spray-pyrolyzed MoO3 thin films by varying precursor molarity, as hole-selective contact for silicon-based heterojunction devices."* Journal of Materials Science: Materials in Electronics 31, no. 23 (2020): 21802-21812.

[6] Mousavi-Zadeh Seyyed Hamid, Mohammad Bagher Rahmani, *"Synthesis and ethanol sensing characteristics of nanostructured MoO_3: Zn thin films."* Surface Review and Letters 25, no. 01 (2018): 1850046.

[7] Sayede A. D., Amriou T., Pernisek M., Khelifa B., Mathieu C., *"An ab initio LAPW study of the α and β phases of bulk molybdenum trioxide, MoO_3."* Chemical physics 316, no. 1-3 (2005): 72-82.

[8] Kamoun O., Boukhachem A., Amlouk M., Ammar S., *"Physical study of Eu doped MoO_3 thin films."* Journal of Alloys and Compounds 687 (2016): 595-603.

[9] Bouzidi A., Benramdane N., Tabet-Derraz H., Mathieu C., Khelifa B., Rachel Desfeux, "*Effect of substrate temperature on the structural and optical properties of MoO_3 thin films prepared by spray pyrolysis technique."* Materials Science and Engineering: B 97, no. 1 (2003): 5-8.

[10] Abinaya A., Jeyaprakash B. G., *"Structural, surface and mechanical characterization of spray-deposited molybdenum disulfide thin films."* Materials Science in Semiconductor Processing 31 (2015): 582-587.

[11] Patil P. R., Patil P. S., "*Preparation of mixed oxide MoO_3–WO_3 thin films by spray pyrolysis technique and their characterisation."* Thin Solid Films 382, no. 1-2 (2001): 13-22.

[12] Khalate S. A., Kate R. S., Pathan H. M., Deokate R. J., *"Structural and electrochemical properties of spray deposited molybdenum trioxide (α-MoO_3) thin films*." Journal of Solid-State Electrochemistry 21, no. 9 (2017): 2737-2746.

[13] Balaji M., Chandrasekaran J., Raja M., Rajesh S., "*Structural, optical and electrical properties of Ru doped MoO3 thin films and its P–N diode application by JNS pyrolysis technique."* Journal of Materials Science: Materials in Electronics 27, no. 11 (2016): 11646-11658.

[14] Kamoun O., Boukhachem A., Alleg S., Jeyadevan B., Amlouk M., "*Physical study of nano-structured MoO3 films codoped with cobalt and nickel in which there is a ferro-diamagnetic transition."* Journal of Alloys and Compounds 741 (2018): 847-854.

[15] Fadavieslam, *"Deposition and characterization of SnO_2:Sb thin films fabricated*

probing of trimethylamine at room temperature." Materials Research Bulletin 130 (2020): 110944.

[24] Chaturvedi, Neha, Sanjay Kumar Swami, Viresh Dutta, *"Electric field assisted spray deposited MoO_3 thin films as a hole transport layer for organic solar cells."* Solar Energy 137 (2016): 379-384.

[25] Afify H. H., Hassan S. A., Abouelsayed A., Demian S. E., Zayed H. A., *"Coloration of molybdenum oxide thin films synthesized by spray pyrolysis technique."* Thin Solid Films 623 (2017): 40-47.

[26] Mahajan S. S., Mujawar S. H., Shinde P. S., Inamdar A. I., Patil P. S., *"Structural, morphological, optical and electrochromic properties of Ti-doped MoO_3 thin films."* Solar energy materials and solar cells 93, no. 2 (2009): 183-187.

[27] Boukhachem A., Kamoun O., Mrabet C., Mannai C., Zouaghi N., Yumak A. Y. Ş. E., Boubaker K., Amlouk M., *"Structural, optical, vibrational and photoluminescence studies of Sn-doped MoO_3 sprayed thin films."* Materials Research Bulletin 72 (2015): 252-263.

[28] Asadpour Arzefooni, Izadifard, Ghazi, *"Investigation of structural and optical properties of CH_3NH_3SnI3 Perovskite layers synthesized by one-step thermal evaporation technique".* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 2020;28(4):1037-50.

[29] Asadpour Arzefooni, Izadifard, Ghazi, Arab Pour, *"Study of Structural, Optical and Electrical Properties of MA(FA)$SnICl_2$ Perovskite Thin Films Synthesized by One-Step Spin Coating"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 29 (2021) 919-932.

[30] Boudaoud, L., N. Benramdane, A. Bouzidi, A. Nekerala, Rachel Desfeux. *"$(MoO_3)_{1-x}(V_2O_5)_x$ thin films: Elaboration and characterization."* Optik 127, no. 2 (2016): 852-854.

[31] Chandoul F., A. Boukhachem F. Hosni, Moussa H., Fayache M. S., Amlouk M., Raphaël Schneider, *"Change of the properties of nanostructured MoO_3 thin films using gamma-ray irradiation."* Ceramics International 44, no. 11 (2018): 12483-12490.

[32] Vivek P., Chandrasekaran J., Marnadu R., Maruthamuthu S., Balasubramani V., Balraju P., *by the spray pyrolysis method".* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 2019;27(3):739-46.

[16] Pakniyat, Motevalizadeh, Jami, *"The effect of Ga-doping on the structural and optical properties of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis".* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 2019;27(3):747-52.

[17] Faraji S., Bagheri-Mohagheghi M-M., Mousavi M., *"Study of the Synthesis Process of MoO3 to MoS2 Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis: The Effect of [S/Mo] Mole Concentration and Sulfurization Process."* Journal of Electronic Materials 50, no. 6 (2021): 3341-3347.

[18] Martínez H. M., Torres J., López-Carreño L. D., Rodríguez-García M. E., *"The Effect of substrate Temperature on the Optical Properties of MoO3 Nano-crystals prepared using spray pyrolysis."* Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 26, no. 7 (2013): 2485-2488.

[19] Ghazkoob Z., Zargar M., Kazeminejad I. Lari, S.M., *"Synthesis of $BiVO_4$ nanoparticles by the co-precipitation method and study the crystal structure, optical and photocatalytic properties of them".* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 2020;28(3):797-806.

[20] Benameur N., Chakhoum M. A., Boukhachem A., Dahamni M. A., Ghamnia M., Hacini N., Pireaux J-P., Houssiau J-P., Ziouche A., *"Investigation of some physical properties of pure and Co-doped MoO3 synthesized on glass substrates by the spray pyrolysis method."* Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 234 (2019): 71-79.

[21] Deokate, Ramesh J., Ranjit Kate, Nanasaheb M. Shinde, Rajaram S. Mane, *"Energy storage potential of sprayed α-MoO 3 thin films." New* Journal of Chemistry 45, no. 2 (2021): 582-589.

[22] Vivek P., Chandrasekaran J., Marnadu R., Maruthamuthu S., *"Fabrication of Illumination-dependent Cu/p-Si schottky barrier diodes by sandwiching MoO_3 nanoplates as an interfacial layer via JNSP technique".* Journal of Electronic Materials, 49 (2020) 4249-4264.

[23] Srinivasan, Parthasarathy, John Bosco Balaguru Rayappan, *"Growth of α-MoO_3 golf ball architectures with interlocking loops for selective*

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.785]

properties of spray coated Cu-MoO3 thin films: evaluation of n-CuMoO$_{3/}$p-Si junction diodes by JV, Norde and Cheung's methods." Materials Research Express 6, no. 10 (2019): 106404.

"Zirconia modified nanostructured MoO3 thin films deposited by spray pyrolysis technique for Cu$_{/}$MoO$_{3}$-ZrO$_{2/}$p-Si structured Schottky barrier diode application." Optik 199 (2019): 163351.

[33] Balaji M., Chandrasekaran J., Raja M., Marnadu R., *"Impact of Cu concentration on the*

[DOI: 10.61186/ijcm.31.4.785]